

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СТРУИ ГИДРОМОНИТОРА ПРИ НАЛИЧИИ В ВОДЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВЫХ ЧАСТИЦ

Шкаруба Н.А., Шарыпов Н.А., Кисляков В.Е.

*В работе приведены результаты литературного обзора и показаны различные варианты вычисления длины струи гидромонитора. Сравниваются варианты расчета работы гидромонитора, обусловленные технологическими схемами отработки, в частности, при подрезке уступа, когда угол наклона ствола гидромонитора к горизонту равен или меньше нуля. Рассмотрено влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде на длину струи гидромонитора, представлены результаты моделирования в лабораторных условиях, выполнено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами вычислений по известным уравнениям, составлена математическая модель расчета длины струи, определена ее статистическая значимость.*

*Ключевые слова:* месторождение, гидромонитор, струя гидромонитора, тонкодисперсные грунтовые частицы, подрезка уступа, напорная вода, моделирование, математическая модель, регрессионный анализ.

При разработке месторождений с использованием гидромониторной отбойки для обеспечения производства напорной водой применяют специальные пруды-отстойники оборотного водоснабжения [1]. В процессе работы по такой схеме в воде неизбежно накапливаются взвешенные тонкодисперсные грунтовые частицы, так как скорость их оседания очень мала. Содержание тонкодисперсных грунтовых частиц увеличивает массу единицы объема воды, то есть ее плотность. Исходя из этого можно сделать вывод, что для гидромониторной отбойки фактически используется вода, имеющая плотность  $\rho > 1000 \text{ кг/м}^3$ , кроме того, она является гетерогенной смесью – неньютоновской жидкостью [2] – и применение для расчетов зависимостей, основанных на законе изменения количества движения И. Ньютона, не будет давать достоверных результатов.

Целью настоящего исследования является определение длины струи, выходящей из горизонтально установленного ствола гидромонитора в условиях оборотного технологического водоснабжения (содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде).

Для расчета длины струи  $l_c$  в различных источниках предлагаются следующие варианты.

В гидромеханизации [3-6] максимальную длину струи гидромонитора ( $l_c$ , м) чаще всего определяют из выражения:

$$l_c = \frac{k_{\text{воз}} \cdot v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{воз}}$  – коэффициент, учитывающий сопротивление воздуха;  $v_0$  – скорость истечения струи из насадки, м/с;  $\alpha$  – угол наклона струи (ствола гидромонитора) к горизонту, град.;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

При этом, в [4] и [6] даны ограничения применения выражения (1):  $\alpha=20-30^\circ$ ,  $k_{\text{воз}}=0,85-0,95$ . Поэтому для условий расчета выражение (1) неприменимо. К тому же,  $\sin 0^\circ=0$ , то есть  $l_c$  в таком случае тоже равна 0 м, чего не наблюдается в реальных условиях.

Авторы [7 и 8], без ограничений, предлагают использовать для определения теоретической дальности полета (боя) струи гидромонитора выражение 2, которое, как и в уравнении (1), содержит среди множителей  $\sin \alpha$ , при  $\alpha=0^\circ$  дающее значение  $l_c=0$  м

$$l_c = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{g}. \quad (2)$$

Кроме того, в формуле (2) не учтено влияние сопротивления воздуха и, скорее всего, допущена опечатка, так как в процессе математического преобразования получается следующее. Уравнение траектории струи в параметрической форме:  $x = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$ ,  $y = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}$

. Исключая время получим:  $y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha}$ . Полагая  $y = 0$ , а  $x = l_c$ , получим:  $l_c = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}$ .

Авторами [9-11] предложена функция, описывающая более сложную траекторию истечения струи из насадки, а в [10 и 11], кроме того, предлагается для определения именно горизонтальной дальности полета струи, но при  $\alpha=0^\circ$  также дающая значение  $l_c=0$  м:

$$l_c = \frac{v_0 \cdot \sin 2\alpha}{2g}. \quad (3)$$

В источниках [12] и [13] максимальную длину струи гидромонитора предлагают определять исходя из того, что насадка является малым отверстием, то есть диаметр насадки  $d_n < 0,1H_0$ , применив законы истечения жидкостей из малых отверстий, исключая из уравнения угол  $\alpha$  и определяя дальность полета струи только исходя из напора и высоты установки ствола над землей:

$$l_c = 2\phi \sqrt{H_0 \cdot h_y}, \quad (4)$$

где  $\phi$  – коэффициент скорости,  $\phi=0,935$ ;  $H_0$  – напор перед насадкой, м;  $h_y$  – высота установки ствола гидромонитора, м.

В источнике [14] для определения дальности полета струи  $l_c$  предложено выражение:

$$l_c = \frac{2H_o \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{1 + \frac{k_{\text{воз}}}{d_H} \cdot H_o}, \quad (5)$$

где  $d_H$  – диаметр насадки, м,

а в источнике [15] – уравнение (6), описывающее траекторию струи  $h_c$ , м

$$h_c = \frac{g \cdot l_c^2}{2v_o^2 \cdot \cos^2 \alpha} \pm l_c \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (6)$$

По эмпирическим данным, полученным в результате экспериментов, Н.П. Гавыриным [16] получено уравнение длины струи (7), предлагаемое авторами работ [9-11] и [17-19] для определения наиболее эффективной длины струи без ограничений, а в источнике [15] – при условии, что  $\alpha=5-30^\circ$ ,  $d_H=5-50$  мм,  $H_o=10-80$  м, в [17] и [18] ограничения похожи:  $\alpha=5-32^\circ$ ,  $d_H=5-50$  мм,  $H_o=30-80$  м. Введение ограничений справедливо, так как Н.П. Гавырин проводил эксперименты на дождевальных установках

$$l_c = 0,415 \sqrt[3]{\alpha \cdot d_H \cdot H_o^2}. \quad (7)$$

В [7] присутствуют те же ограничения, но выражение (7) представлено в интерпретации (8), а в [20] оно показано в виде уравнения (9), но с ограничениями, как в [15]

$$l_c = 0,415 \sqrt{\alpha \cdot d_H \cdot H_o^2}, \quad (8)$$

$$l_c = 0,415 H_o \sqrt{\alpha \cdot d_H}. \quad (9)$$

Однако значения, получаемые при расчете с помощью уравнений (8) и (9), дают завышенный, несравнимый с натурными наблюдениями, результат, из чего можно сделать вывод, что в источниках [7] и [20] допущена опечатка.

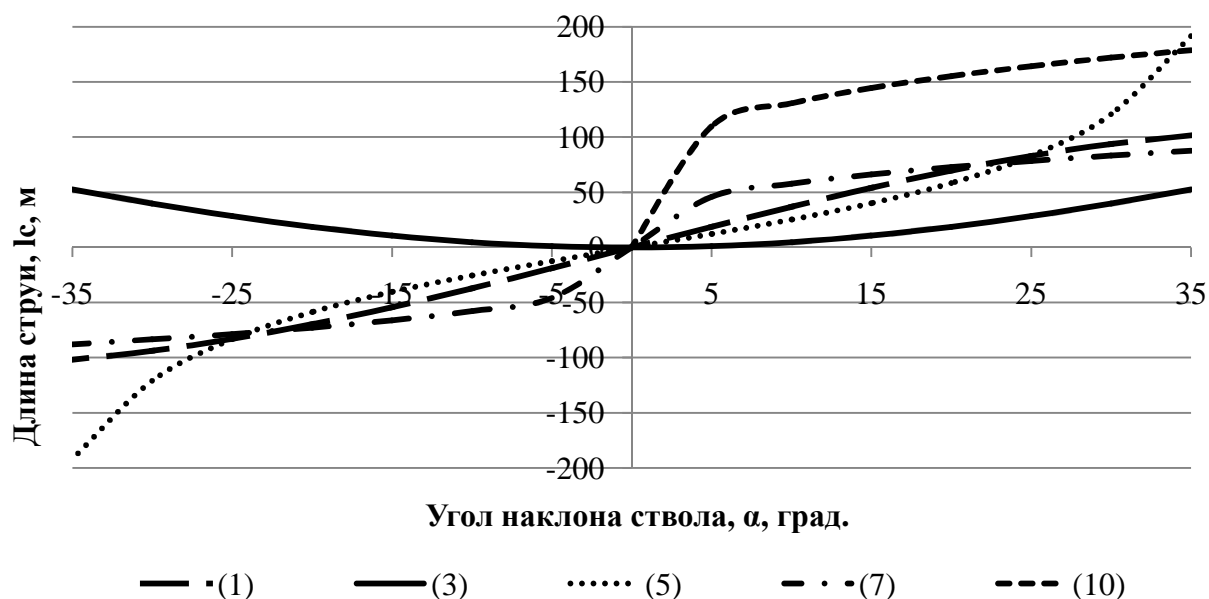
В [9] различают дальность полета струи и предельную дальность полета струи, первую из которых определяют из выражения (3), а вторую – из выражения (10), из которого также можно вычислить необходимый напор (11). Следует отметить, что для условий отрицательных значений угла  $\alpha$  выражение (10) не имеет решения.

$$l_c = 1,27 \cdot d_H^{0,94} \cdot \sqrt[4]{\alpha} \approx d_H \sqrt[4]{\alpha}, \quad (10)$$

где  $d_H$  – диаметр насадки, м.

$$H_o = \frac{3,75 \cdot d_H}{\sqrt[3]{\alpha}}. \quad (11)$$

Графики уравнений (1), (3), (5), (7), (10) показаны на рисунке 1 для условий перемещения ствола большинства гидромониторов:  $\alpha=\pm 35^\circ$  ( $H_o=60$  м,  $d_H=75$  мм).



**Рис. 1. – Графики уравнений 1, 3, 5, 7, 10**

Для значений высоты основных типов гидромониторов [21] при угле наклона ствола  $\alpha=0^\circ$  максимальная длина струи  $l_c$  по выражению (4) ( $H_0=60$  м,  $d_n=75$  мм) при высоте установки ствола гидромонитора  $h_y=1-5$  м составит:  $l_c=14,5-32,4$  м.

Сопоставляя данные рисунка 1 и полученные значения возможно предположить, что наиболее достоверно длина струи может быть вычислена при помощи уравнения (7).

В связи с вышеизложенным очевидно, что большинство указанных уравнений имеют существенные ограничения в применении, для расчета длины струи  $l_c$  при угле наклона ствола гидромонитора  $\alpha=0^\circ$  приемлемый результат дает только уравнение (4). Кроме того, при отрицательных значениях угла  $\alpha$  (рисунок 1) выражения (1), (5), (7) дают в качестве результата отрицательные значения длины струи; из-за небольшого интервала условий применения рассмотренных выше формул значительное количество вариантов технологии отработки месторождений фактически не могут быть рассчитаны. Кроме того, ни одна из обозначенных зависимостей не учитывает влияние содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде или ее плотность.

Для определения влияния наличия в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц проведена серия экспериментов в масштабе 1:10 при помощи лабораторной установки [22], исходные данные показаны в таблице 1.

Эксперименты проведены в случайной последовательности, при соблюдении геометрического подобия и подобия процессов, протекающих в системах модели и натурного образца – критерий подобия Рейнольдса и критерий подобия Фруда [23].

Содержание тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде соотнесено с плотностью воды, так как вмещающие породы на месторождениях различны (имеют различную плотность), и при одинаковом содержании тонкодисперсных грунтовых частиц в воде ее плотность будет различна. Содержание твердых частиц в воде  $c$  и ее плотности  $\rho$  произведено для случая, когда удельный вес грунтовых частиц  $\gamma=1,6 \text{ т/м}^3$  (таблица 1).

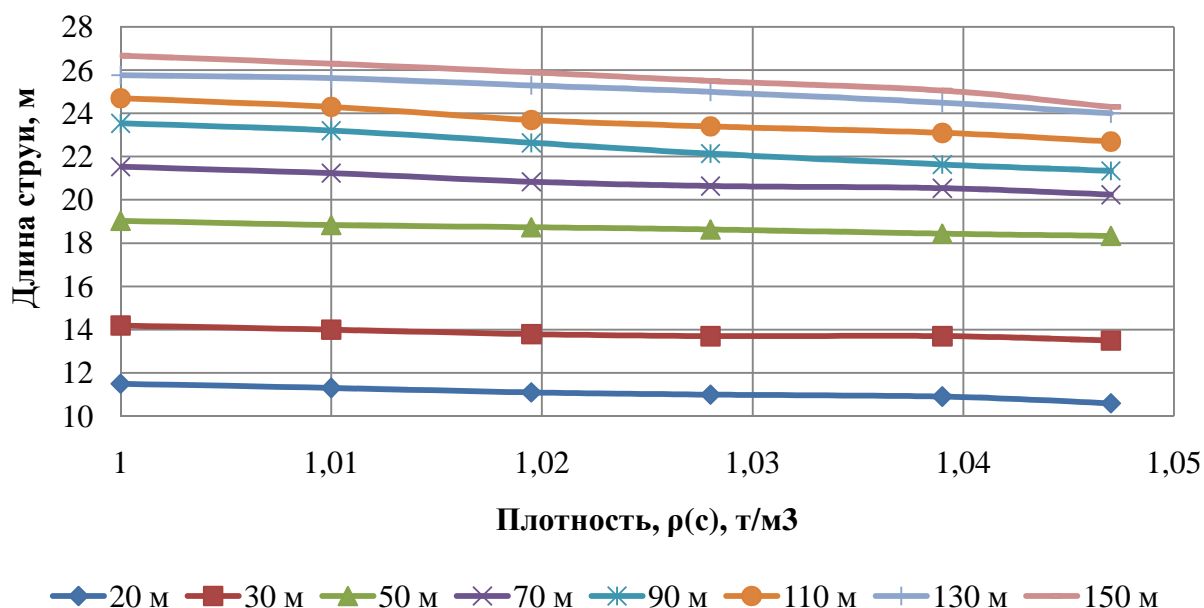
**Таблица 1**

**Исходные данные моделирования**

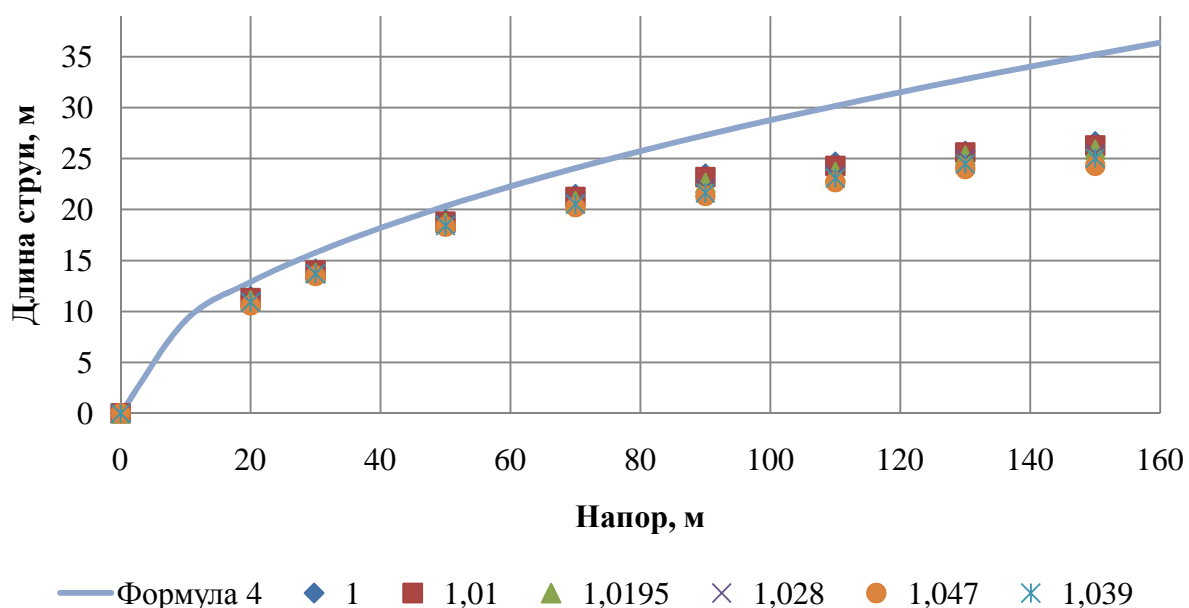
Диаметры насадок, мм	$d_n$	5
		8
		10
Напор на насадке, м водяного столба	$H_0$	2-15
Плотность технологической воды, $\text{кг/м}^3$ , (содержание тонкодисперсных грунтовых частиц $c$ , г/л)	$\rho_1(c_1)$	1000(0)
	$\rho_2(c_2)$	1010(25)
	$\rho_3(c_3)$	1019,5(50)
	$\rho_4(c_4)$	1028(75)
	$\rho_5(c_5)$	1039(100)
	$\rho_6(c_6)$	1047(125)

Эксперимент проводился следующим образом. Замеряют высоту установки гидромонитора. В расходную емкость подают воду необходимой по условиям опыта плотности. Контроль плотности осуществляют при помощи ареометра. На гидромониторе устанавливают насадку определенного диаметра (таблица 1). После включения насоса устанавливают напор, согласно исходным данным. Контроль напора осуществляют при помощи манометров. После достижения установившегося режима работы гидромонитора измеряют максимальную длину струи.

Результаты экспериментов показаны на рисунке 2 и 3 (для условий, когда  $d_n=0,77 \text{ м}$ ), из которых видно, что увеличение плотности напорной воды снижает длину струи гидромонитора на 5-9 %. При сравнении полученных в результате экспериментов данных со значениями, получаемыми при помощи уравнения (4) ( $d_n=0,77 \text{ м}$ , рисунок 3) видно, что теоретический расчет прогнозирует более интенсивное увеличение длины струи гидромонитора при больших напорах.



**Рис. 2. – Зависимость длины струи гидромонитора от содержания тонкодисперсных грунтовых частиц в воде при различном напоре ( $H_0$ )**



**Рис. 3. – Зависимость длины струи гидромонитора от напора при различной плотности воды ( $\rho$ , т/м³)**

В то же время, предыдущие исследования показывают, что в тех же условиях с увеличением содержания в напорной воде тонкодисперсных грунтовых частиц, сила давления на забой ( $P$ , кгс) увеличивается [24].

Очевидно, это объясняется увеличением массы единицы объема воды (то есть ее плотности): влияние ускорения свободного падения ( $g$ , м/с²) увеличивается, сокращая длину струи, но при этом увеличивается инерция и масса воды, воздействующей на забой.

На основе полученных данных методами статистической обработки возможно получить уравнение вида  $l_c = f(H_o, d_n, \rho)$ .

Для получения такой зависимости, выборка данных, полученная в ходе серии экспериментов, содержащая 161 наблюдение ( $n=161$ ), одну зависимую переменную  $l_c$  и три независимых переменных  $d_n$ ,  $\rho$  и  $H_o$ , обработана методами корреляционного и регрессионного анализов.

Из корреляционной матрицы (таблица 2) видно, что максимальную линейную связь с длиной струи со статистической точки зрения имеет напор ( $r=0,89$ ), исследуемые параметры ( $H_o$ ,  $d_n$ ,  $\rho$ ) являются независимыми между собой.

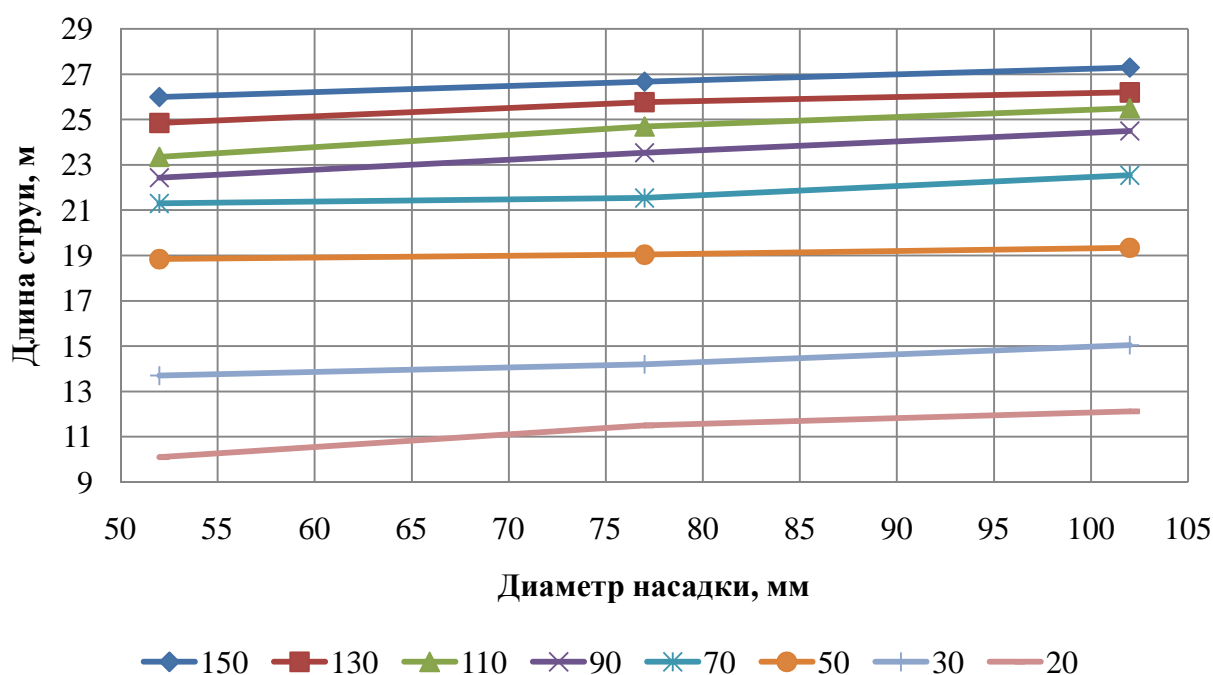
**Таблица 2**

***Корреляционная матрица исследуемых параметров***

Параметр	$d_n$	$H_o$	$\rho$	$l_c$
$d_n$	1	0	0	0,066
$H_o$	0	1	0	0,891
$\rho$	0	0	1	-0,058
$l_c$	0,066	0,891	-0,058	1

Диаграммы рассеяния независимых переменных от зависимой представлены на рисунках 2-4. Из рисунков видно, что все независимые переменные, кроме  $H_o$ , имеют с зависимой переменной линейную (или близкую к ней) связь. Для учета нелинейной зависимости в уравнение модели намеренно включили слагаемое содержащее квадрат переменной  $H_o$ . В данной работе решался вопрос только параметрической идентификации модели [25], со следующей структурой:

$$l_c = b_0 + b_1 \cdot d_n + b_2 \cdot \rho + b_3 \cdot H_o + b_4 \cdot H_o^2. \quad (12)$$



**Рис. 4. – Зависимость длины струи гидромонитора от диаметра насадки при различном напоре ( $H_0$ , м)**

Для построения модели с вышеописанной структурой (12), был использован метод регрессионного анализа [26]. Обработка экспериментальных данных проводилась в MSExcel, с использованием инструмента «пакет анализа» [27]. В результате получена регрессионная модель:

$$l_c = 29,4041 + 0,0254 \cdot d_n - 28,5575 \cdot \rho + H_0 (0,3842 - 0,0016 \cdot H_0). \quad (13)$$

Линейные коэффициенты модели адекватно отражают физическую картину, с увеличением диаметра насадки и напора увеличивается длина струи, а с увеличением плотности жидкости длина струи уменьшается.

Коэффициент детерминации и скорректированный с учетом числа независимых переменных коэффициент детерминации модели равны, соответственно,  $R^2=0,9618$  и  $R^2_{\text{корр}}=0,9608$ . Данные показатели свидетельствуют о том, что модель хорошо описывает дисперсию в исходных данных.

Модель является статистически значимой по  $F$ -критерию,  $F > F_{\text{кр}}$  (расчетное значение  $F=988,78$ ;  $F_{\text{кр}}(0,95, 4, 157)=0,1769$ ).

Для определения статистической значимости коэффициентов модели, использован  $T$ -критерий,  $T_{\text{кр}}(0,05,157)=1,9752$ , наблюдаемые значения представлены в таблице 3. Так как  $|T| > T_{\text{кр}}$ , коэффициенты модели являются статистически значимыми.

**Таблица 3**

***T*-статистики для коэффициентов модели**



Коэффициент	$b_0$	$b_1(d_n)$	$b_2(\rho)$	$b_3(H_0)$	$b_4(H_0^2)$
$T$ -статистика	3,7569	4,2141	-3,7453	39,8314	-25,7325

По результатам проведенных исследований и обработки экспериментальных данных можно сделать следующие выводы.

Наличие тонкодисперсных грунтовых частиц в напорной воде оказывает негативное влияние на длину струи при горизонтальной установке ствола гидромонитора, возрастающее с увеличением напора.

Для определения длины струи при горизонтальном расположении ствола гидромонитора большинство известных уравнений неприменимы, кроме того, ни одно из них не учитывает изменения свойств воды при наличии в ней тонкодисперсных грунтовых частиц.

Получена регрессионная модель, наиболее полно описывающая результаты опытов (с точностью более 96%). Коэффициенты модели являются статистически значимыми.

### Список литературы

1. Кисляков В.Е. Расчет отстойников оборотного водоснабжения при разработке россыпей. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1988. 176 с.
2. Многокомпонентные жидкости [Электронный ресурс] // URL : <http://firing-hydra.ru/index.php?request=full&id=74> (дата обращения 27.04.2016).
3. Шорохов С.М. Технология и комплексная механизация разработки россыпных месторождений. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Недра, 1973. – 768 с.
4. Справочник по разработке россыпей / Под. ред. В.П. Березина, В.Г. Лешкова, Л.П. Мацуева, С.В. Потемкина. – М.: Недра, 1973. – 589 с.
5. Нурок Г.А. Гидромеханизация горных работ. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 392 с.
6. Потемкин С.В. Разработка россыпных месторождений. – М.: Недра, 1995. – 337 с.
7. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А. Большакова. – Киев: Издательское объединение «Вища школа», 1977. – 279 с.
8. Справочник по гидравлике – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.А. Большакова. – Киев: Вища школа, головное изд-во, 1984. – 344 с.
9. Иванов Е.Н. Противопожарное водоснабжение. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.
10. Бессонов Е.А. Энциклопедия гидромеханизированных работ: Словарь-справочник. – М.: 1989.ру, 2005. – 520 с.

11. Юфин А.П. Гидромеханизация. – М.: Стройиздат, 1974. – 223 с.
12. Фридман Б.Э. Разработка россыпных месторождений гидромеханизацией. – М.: Metallurgizdat, 1957. – 472 с.
13. Справочник по гидравлическим расчетам, Изд. 4-е, перераб. и доп. / Под. ред. П.Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
14. Тимофеева С.С., Кустов О.М. Противопожарное водоснабжение. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 69 с.
15. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: справочник, 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Стройиздат. Ленингр. Отд-ие, 1986. – 440 с.
16. Гавырин Н.П. Исследование работы гидромониторов: диссертация. – М.: архив МГМИ, 1939. – 244 с.
17. Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т. Пикалов Ф.И. *Гидравлика*. изд. 4-ое., М.-Л.: Энергия, 1964. 352 с.
18. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам, изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Б.Б. Некрасова. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 385 с.
19. Дерюшева Н.Л. Оптимизация работы снегоплавильных сооружений // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2016. – №1. – С. 46 – 51.
20. Прозоров И.В., Николадзе Г.И., Минаев А.В. Гидравлика, водоснабжение и канализация. – М.: Высшая школа, 1990. – 447 с.
21. Ялтанец И.М., Егоров В.К. Гидромеханизация. Справочный материал. – М.: Издательство МГГУ, 1999. – 338 с.
22. Пат. 169574 РФ Стенд для исследования интенсивности гидромониторной отбойки / В.Е. Кисляков, Н.А. Шкаруба, М.В. Калмаков и др. // Бюл. – 2017. – № 9.
23. Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М., Шеховцов Б.А. Теории подобия и размерностей. Моделирование. – М.: Высшая школа, 1968. – 208 с.
24. Кисляков В.Е., Шкаруба Н.А., Катышев П.В. Исследование силы удара струи гидромонитора о забой // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – №1. – С.268 – 275.
25. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
26. Девис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. Кн. 1. – М.: Недра, 1990. – 319с.
27. Воскобойников Ю.Е. Эконометрика в Excel: парные и множественные регрессионные модели. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 260 с.

## Сведения об авторах

*Шкаруба Наталья Александровна, аспирант кафедры «Открытая разработка месторождений», e-mail: Nshkaruba@sfu-kras.ru, Россия, Красноярск, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий.*

*Шарыпов Никита Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Автоматизация производственных процессов в металлургии», e-mail: NSharypov@sfu-kras.ru, Россия, Красноярск, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Институт цветных металлов и материаловедения.*

*Кисляков Виктор Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., кафедры «Открытые горные работы», Vkslyakov@sfu-kras.ru, Россия, Красноярск, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий.*

## DETERMINATION OF THE LENIN STRUCTURE OF THE HYDROMONITOR WHILE AVAILABLE IN THE WATER OF FINELY DISPERSED GROUND PARTICLES

*Shkaruba, N.A. Sharipov, N.A., Kisliakov, V.E.*

*This paper presents the results of the literature review and shows various options for calculating the jet length of the jet. The variants of the calculation of the operation of the monitor are determined, due to the technological schemes of working off, in particular, when cutting the ledge, when the angle of inclination of the barrel of the hydraulic monitor to the horizon is equal to or less than zero. The influence of the content of fine-dispersed ground particles in the pressure water on the length of the jet of the jet is presented, the results of simulation in laboratory conditions are presented, the experimental data are compared with the results of calculations using known equations, a mathematical model for calculating the jet length is compiled, and its statistical significance is determined.*

*Key words: deposit, hydromonitor, jet stream, finely dispersed ground particles, bench marking, pressure water, modeling, mathematical model, regression analysis.*

*Shkaruba Natalia Alexandrovna, post-graduate student of the Department of Open mining, e-mail: Nshkaruba@sfu-kras.ru, Russia, Krasnoyarsk, Institute of mining, Geology and geotechnologies, "Siberian Federal University".*

*Sharipov Nikita Anatolyevich, senior lecturer of the Department "Automation of Production Processes in Metallurgy", e-mail: NSharypov@sfu-kras.ru, Russia, Krasnoyarsk, Institute of Non-Ferrous Metals and Materials Science, "Siberian Federal University".*

*Kislyakov Victor Evgenievich, doctor of technical science, professor of the Department "Open mining", e-mail: Vkslyakov@sfu-kras.ru, Russia, Krasnoyarsk, Institute of mining, Geology and geotechnologies "Siberian Federal University".*